近28 a克孜河流域天然植被需水满足程度研究

李 骊[1]， 张青青[1]， 李 宏[1]， 王雅梅[1]， 赵新风[2,3,4]

（1. 新疆农业大学草业与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院阿克苏农田生态系统国家野外科学观测研究站，新疆 阿拉尔 843300；4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：以克孜河流域天然植被为研究对象，基于Landsat TM遥感影像及流域统计年鉴，分析了1990年、2000年、2010年及2018年流域天然植被的动态变化，采用潜水蒸散法计算了4个时期流域天然植被的生态需水量，研究了现状年流域天然植被潜水蒸发的极限埋深及恢复需水量。结果表明：(1) 克孜河流域天然植被面积在28 a年间减少了1612.48 km^2，减少幅度18.99%，总覆盖度减少22.26%；(2) 克孜河流域天然植被在4个时期内的需水量分别为7.69×10^8 m^3、7.49×10^8 m^3、6.65×10^8 m^3及5.84×10^8 m^3；(3) 克孜河流域4个时期内流域来水均无法完全满足天然植被的生态需水量，分别缺水6.65×10^8 m^3、7.49×10^8 m^3、6.11×10^8 m^3和5.84×10^8 m^3，流域缺水现象十分严重。为保证天然植被的生态需水，确定5.5 m为潜水蒸发极限地下水位埋深，所需水量为9.73×10^8 m^3。

关键词：天然植被；生态需水；克孜河流域；满足程度

水是生态环境保护与建设中起重要作用的生态因子，水资源状况往往决定了区域生态保护建设的目标和方向[1]，因此生态需水的研究逐渐成为全球生态环境变化和可持续发展领域关注的热点问题。1940年，美国野生动物保护组织在对河流生态系统的研究中首次提出了河道基本生态环境需水量的概念，到20世纪90年代后，生态需水的概念逐步由河流生态系统扩展至森林、草地、湿地、湖泊等其他生态系统[2]。目前，学者们对不同生态系统需水量的研究目的主要是防范生态系统退化，或对已退化生态系统的恢复与重建提供数据支撑。而在众多国内外的研究中，学者们也一致认为，退化生态系统恢复与重建的关键在于恢复天然植被[3]。因此，天然植被生态需水的研究也成了当下研究的热点问题，并且主要集中在水资源缺乏的干旱与半干旱地区。近几年国内众多学者也从不同的方向对干旱区天然植被生态需水的理论机制展开广泛研究，并且取得了重要进展[4-8]。周丹等[9]研究了西北干旱区1982—2010年间天然植被动态变化，对不同覆盖度植被进行了生态需水量的估算；王根绪等[10]基于不同植被的蒸散发估算模型，以黑河流域为例提出了评价不同时期植被生态需水的方法；张瑞君等[11]通过对石羊河流域天然植被生态需水的研究，预测了流域未来8 a天然植被生态需水量。水作为生命之源，在保障区域生态稳定的供给方面显得尤为重要，尤其在干旱区内陆河流域更为突出，因此，生态需水的研究也就成为了目前干旱区生态问题研究的重中之重。

克孜河流域是喀什噶尔河流域最大的河流，位于新疆西南部，是塔里木河流域源流的重要支流之一，同时也是丝绸之路经济带的区域中心。东部受塔克拉玛干大沙漠的影响，流域内降水量稀少且蒸发强烈，气候干燥，昼夜温差大，形成极度干旱的典型大陆性气候。近年来，随着流域人口数量的增加，传统以农牧业为主的经济结构导致人们对土地的依赖和索取进一步扩大，农田扩张、建筑用地日益增加，严重侵占天然植被面积，导致流域内的生态系统已呈现加速退化的趋势。克孜河流域因占据重要的地理位置其生态环境的质量关乎整个地区乃至全疆的经济发展，探究克孜河流域天然植被

收稿日期：2020-11-18； **修订日期：**2021-03-04
基金项目：国家自然基金项目(2515GZRZZ)；喀什噶尔河流域规划项目《喀什噶尔河流域陆生生态现状调查与陆生生态回顾性评价》资助
作者简介：李骊(1995-)，女，硕士研究生，主要从事草地生态学方面的研究. E-mail: 785146615@qq.com
通讯作者：张青青. E-mail: 108585302@qq.com

动态及生态需水满足程度变化旨在明确克孜河流域天然植被生态保护目标，同时也为水资源合理分配提供科学依据。

1 研究区概况

克孜河流域位于新疆西南部，多年平均径流量 21.73×10^{8} m^3，地处39°00′~40°18′N，73°70′~78°03′E之间（图1）。流域北部为天山西南山脉的柯坪山系，与克孜勒苏柯尔克孜自治州为邻；东部自巴楚县为流域下游绿色走廊河段，连接叶尔羌河流域的下游灌区；南部与喀什噶尔河水系的盖孜河流域相连；西部的阿克陶县与乌恰县为流域上游源流区域，处于西南天山与昆仑山系的结合部，由买尔干苏河、托古球尔河及卓尤勒汗苏河在乌恰县境内与克孜河汇合[12]。流域自上而下流经克孜勒苏柯尔克孜自治州的乌恰县及喀什地区的疏附县、喀什市、疏勒县、伽师县。而后在阿克苏地区阿瓦提县乌鲁却勒镇境内与叶尔羌河汇流，之后在两河汇合口处下游50 km处与和田河再次汇流，最终流入塔里木河流域。流域总面积约25407.42 km^2，属典型温带大陆性干旱气候，气候温和，四季分明，热量丰富，降水稀少且蒸发量大，空气干燥，光照充足，无霜期长。多年平均气温11.2~12.0 ℃，多年平均降水量25~85 mm。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究所用的遥感影像数据来源于1990年、2000年、2010年及2018年Landsat TM影像，分辨率为30 m，云覆盖<5%，成像时间为均为7—8月，这一时期为克孜河流域丰水期，河流、水库等水量较大，自然植被及农作物生长茂盛，地物特征明显[13]。分别对4个时期的影像进行人工目视解译，人机交互式判读确定其土地利用类型，而后根据实地调研情况进行矢量图验证与矫正工作，最后根据《土地利用现状分类》（GB/T21010-2017）与研究区高光谱数据，参考土地利用特征、Landsat-TM影像数据的空间分辨率结合流域实地调查结果，共确定区分出有林地、灌木林地、疏林地、高覆盖草地、中覆盖草地及低覆盖草地等6类植被类型。

根据河道长度及流域周边的水分条件从高到低将克孜河分为上、中、下游3个河段，在各河段垂直于河道方向上分别设置3条监测样带，每一条监测样带在离河道500 m、1000 m、1500 m处分别设置3组50 m×50 m的大样方，共设置81个固定乔木样方；在每一个乔木样方中选择1个20 m×20 m的灌木样方，乔、灌木的高度、密度、冠幅、胸径等指标。再随机设置3个草本小样方，大小为1 m×1 m，记录每个小样方草本的个体数、盖度、高度、密度、生物量等指标，此次调查共计样方305个。以GPS定位，记录每个样地的海拔高度、经纬度等信息，同时收集样地所在井位的地下水埋深数据[14]。

克孜河流域天然植被分布于阿克陶县、乌恰县、疏附县、疏勒县、岳普湖县、伽师县、喀什市、图木舒克市、巴楚县、柯坪县及阿瓦提县，因此根据研究内容，以上述县市行政单位为统计单元，利用《新疆统计年鉴》和《新疆兵团统计年鉴》调查流域1990—2018年间的河流径流量与居民引水量等数据，同时向相关水利单位收集研究区河道基本生态需水量数据。

以2018年为现状年。

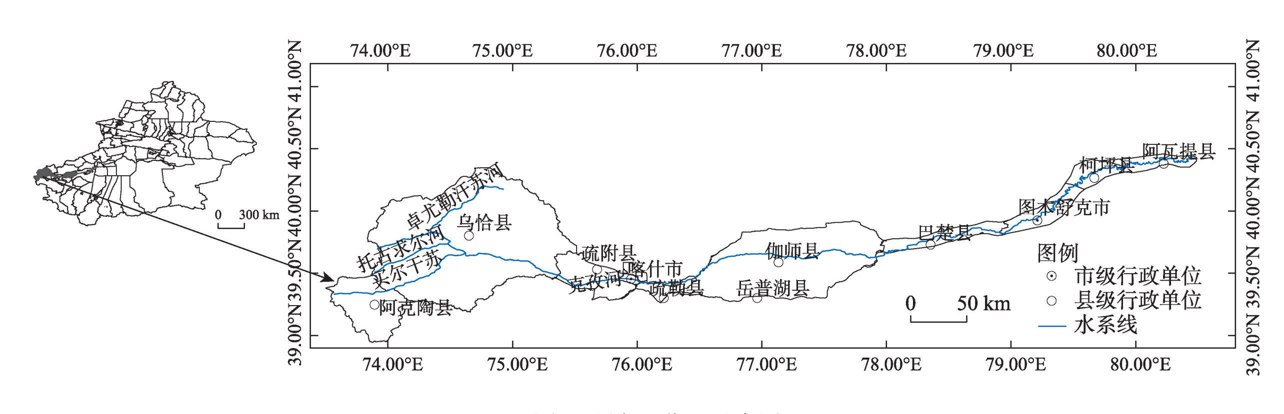


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Overview of the study area

2.2 数据处理

2.2.1 潜水蒸散法　以某一植被类型在某一潜水位的面积乘该潜水位下的潜水蒸发量,可得该类植被的生态需水量,研究区各类型植被生态需水之和即为天然植被需水总量[15],计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^{n} 10^{-3} K_i A_i W_{gi} \quad (1)$$

式中:W为天然植被需水量(10^8 m^3);K_i表示植被影响系数(表1);A_i为植被类型i的面积(km^2);W_{gi}为植被类型i在某一地下水埋深时的潜水蒸发量(mm)。

$$W_{gi} = a(1 - h_i/h_{max})^b E_{\phi 20} \quad (2)$$

式中:a、b为经验系数,分别取值为0.62、2.80;h_i为植被类型i的地下水埋深(m);h_{max}为潜水蒸发极限埋深(m),确定为5.5 m;$E_{\phi 20}$为常规蒸发皿水面蒸发量(mm),根据流域内气象观测站取值2392.24 mm;根据陈亚宁[16-17]等对塔里木河流域"九源一干"乔木、灌木及草本不同植被盖度和不同植被结构地下水埋深分布特征及王让会等[18]对西北干旱区生态需水的规律研究确定天然林草地下水埋深及植被影响系数(表1)。

2.2.2 河道水面蒸发计算　河道水面蒸发是河道水量损耗的主要组成之一。克孜河河道水面蒸发量采用面积定额法计算[19]:

$$W_L = A_L \times E_\phi \times k \quad (3)$$

式中:W_L为水面蒸发量(10^8 m^3); E_ϕ 为直径20 cm水面蒸发皿观测的水面蒸发量(mm);k为水面折算系数,借鉴塔里木河干流的相关研究成果,取阿拉尔站与博斯腾湖的水面折算系数平均值0.62;A_L为河段水面面积(m^2),采用遥感解译的方法获得。

2.2.3 计算流域剩余可供天然植被调用水量　本研究采用水量平衡方程计算可供天然植被调用水量[20]。

$$W_u = W_D - W_O - W_B - W_L \quad (4)$$

式中:W_u为流域可供天然植被调用水量(10^8 m^3),包含来水量除河道基本生态需水量、居民饮用水量及河道水面蒸发水量外的剩余水量(10^8 m^3)及渗漏水量(10^8 m^3);W_D为河流来水量(10^8 m^3);W_O为区间河段人类活动引水量(10^8 m^3);W_B为河道基本生态需水量(10^8 m^3);W_L为河道水面蒸发水量(10^8 m^3)。

2.2.4 天然植被缺水量计算

$$W_q = W - W_u \quad (5)$$

式中:W_q为天然植被缺水量(10^8 m^3);W为天然植被生态需水量(10^8 m^3)。当$W_q > 0$时,天然植被缺水量为计算所得值;当$W_q < 0$时,W_q=W。

2.2.5 天然植被生态需水满足程度计算

$$Y = W_u / W \quad (6)$$

式中:Y为天然植被生态需水满足程度(%)。

2.2.6 恢复地下水位所需水量　克孜河流域地下水位恢复需水量W_R计算公式如下[21]:

$$W_R = \mu \times A \times \left| h_{恢复} - h \right| \quad (7)$$

式中:W_R表示恢复地下水位所需水量(m^3·a^{-1});μ表示含水层岩层的给水度;A表示地下水位埋深的面积(m^2);$h_{恢复}$表示恢复到目标地下水位(m);h表示地下水现状埋深(m)。

3 结果与分析

3.1 克孜河流域天然植被分布时序变化特征

基于克孜河流域1990年、2000年、2010年及2018年的遥感影像数据统计4个时期天然植被总面积(图2)可知,克孜河流域天然植被总面积呈现明显下降的变化趋势,28 a间流域天然植被总面积减少1612.48 km^2,减少幅度18.99%。由图3可以看出,其中面积减少最明显的为中覆盖草地,28 a间减少面积760.45 km^2,减少幅度32.58%,变化最小的为低覆盖草地,减少面积402.18 km^2,减少幅度仅10.89%。其余有林地、灌木林地、疏林地及高覆盖草地分别减少幅度25.11%、31.20%、11.17%及22.09%。

根据图4可知,流域内以阿克陶与乌恰县为主的上游地区在28 a间植被面积略微有所上涨,增加面积161.32 km^2;由疏附县至伽师县区域的中游绿

表1　克孜河流域不同植被类型的影响系数

Tab. 1　Vegetation influence coefficients of different vegetation types in the Kezi River Basin

植被类型	有林地	疏林地	灌木林地	高覆盖草地	中覆盖草地	低覆盖草地
影响系数	1.45	1.38	1.00	1.45	1.35	1.00
平均地下水埋深/m	2.5	3	4.5	2.5	3	4

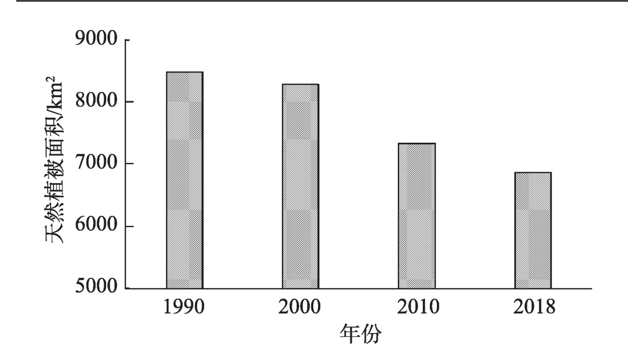


图2 克孜河流域4个时期天然植被总面积变化

Fig. 2 Changes in the total area of natural vegetation in the Kezi River Basin in 1990, 2000, 2010 and 2018

洲流域与伽师县至尾闾的下游绿色走廊流域天然植被变化明显，分别减少面积1484.67 km²与512.53 km²；上、中、下游区域天然植被面积变化幅度分别为4.74%、−41.61%及−29.47%。由图5可以看出，克孜河流域天然植被覆盖空间分布呈现东部地区高，中部及西部地区低的趋势，且天然植被覆盖度随时间呈逐渐减少的变化趋势，28 a间流域植被总覆盖度减少22.26%；其中上、中、下游流域覆盖度变化幅度分别为15.37%、−39.28%及−26.72%。

3.2 克孜河流域天然植被生态需水

根据克孜河流域天然植被分布特征，利用公式(1)分别计算流域1990年、2000年、2010年及2018年天然植被生态需水量(表2)，4个时期天然植被生态需水总量分别为7.69×10⁸ m³、7.49×10⁸ m³、6.65×10⁸ m³及5.84×10⁸ m³；流域天然植被的生态需水量有所减少；相比1990年，2018年天然植被生态需水量减少2.12×10⁸ m³，减少幅度26.64%。在4个时期内流域天然植被需水量最高的植被类型为中覆盖草地，生态需水量分别为3.59×10⁸ m³、3.63×10⁸ m³、2.92×10⁸ m³及2.42×10⁸ m³，分别占总需水量的45.10%、48.46%、43.91%及41.44%；需水量最低的植被类型为疏林地，4个时期需水分别为0.19×10⁸ m³、0.19×10⁸ m³、0.18×10⁸ m³及0.17×10⁸ m³，仅占总需水量的2.39%、2.54%、2.71%及2.91%；其余有林地、灌木林地、高覆盖草地及中覆盖草地需水量4个时期分别为1.00×10⁸ m³、0.30×10⁸ m³、1.50×10⁸ m³及0.55×10⁸ m³，分别占总生态需水量的16%、5%、24%及8%。

3.3 基于天然植被保护的生态需水满足程度变化及地下水恢复水量

3.3.1 不同时段天然植被生态需水满足程度变化 克孜河流域1990年、2000、年2010年及2018年河流来水量(表3)分别为30.09×10⁸ m³、27.83×10⁸ m³、33.48×10⁸ m³及27.19×10⁸ m³；根据Tennant法计算结果克孜河流域在4个时期内的河道基本生态需水分别为9.03×10⁸ m³、8.35×10⁸ m³、10.04×10⁸ m³及8.16×10⁸ m³，同时根据公式(3)计算出克孜河年蒸发水量

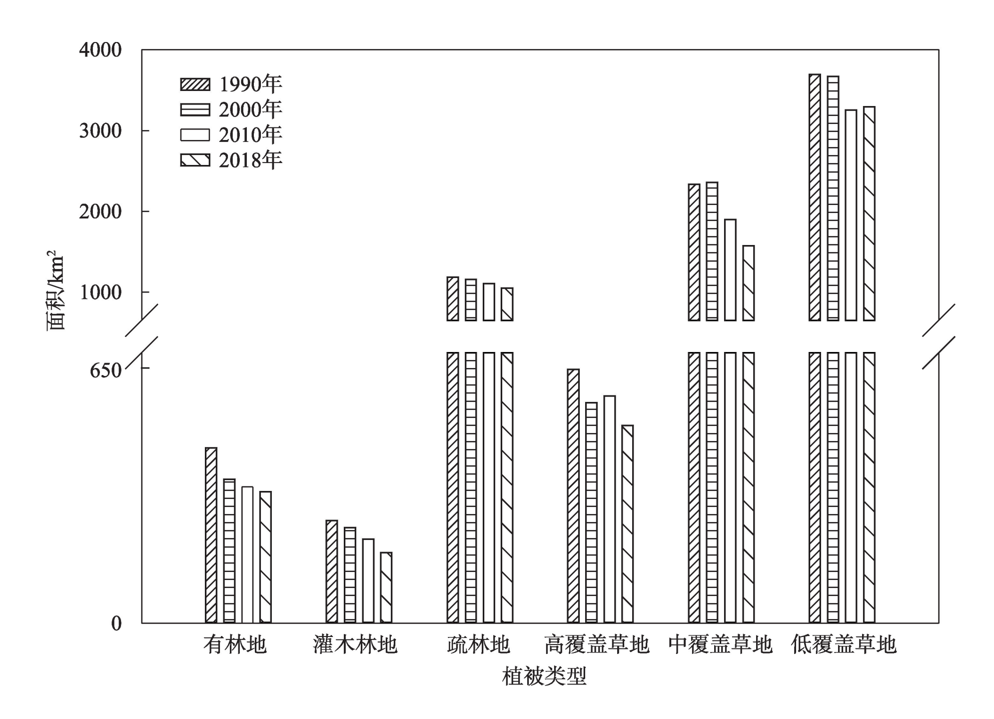


图3 克孜河流域4个时期天然植被各类型面积时序变化

Fig. 3 Time series change of various types of natural vegetation in the four periods of the Kezi River Basin

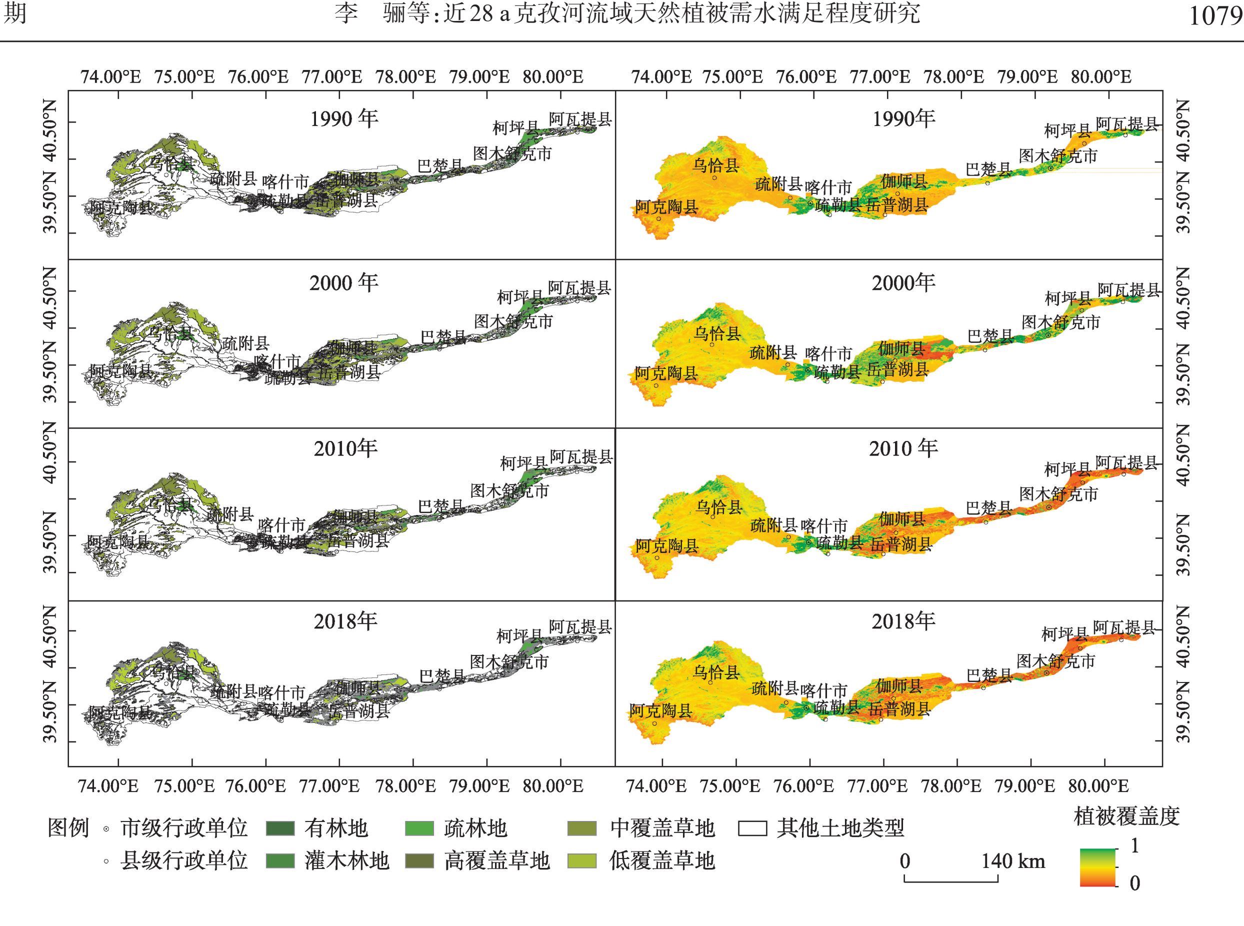


图4　克河流域4个时期天然植被分布与覆盖度变化

Fig. 4　Distribution and coverage changes of natural vegetation in the four periods of the Kehe River Basin

表2　克孜河流域天然植被生态需水量时序变化

Tab. 2　Time series change of natural vegetation ecological water demand in Kezi River Basin

植被类型	1990—2018年天然植被面积/km²				1990—2018年植被生态需水量/10⁸ m³			
	1990年	2000年	2010年	2018年	1990年	2000年	2010年	2018年
有林地	421.61	346.06	327.75	315.76	1.30	1.07	1.01	0.98
灌木林地	246.52	230.08	201.74	169.6	0.39	0.36	0.32	0.27
疏林地	1184.9	1156.63	1103.17	1052.54	0.19	0.19	0.18	0.17
高覆盖草地	609.8	529.76	546.13	475.09	1.88	1.64	1.69	1.47
中覆盖草地	2333.79	2358.06	1897.61	1573.34	3.59	3.63	2.92	2.42
低覆盖草地	3692.94	3669.78	3254.56	3290.75	0.60	0.60	0.53	0.54
总计	8489.56	8290.37	7330.96	6877.08	7.96	7.49	6.65	5.84

分别为5.92×10⁸ m³、4.03×10⁸ m³、3.46×10⁸ m³及2.76×10⁸ m³。根据收集的4个时期内流域居民引水量13.83×10⁸ m³、15.71×10⁸ m³、19.43×10⁸ m³及24.55×10⁸ m³,计算出流域4个时期的河流的剩余水量,即分别为1.31×10⁸ m³、−0.53×10⁸ m³、0.54×10⁸ m³及−8.29×10⁸ m³;根据公式(4)计算可知4个时期内1990年与2010年天然植被可调用水量分别为1.31×10⁸ m³及0.54×10⁸ m³,相比天然植被的生态需水量,根据公式(6)计算可得其满足程度仅为16.48%与8.13%;而2000年与2018年天然植被无可调用水量,其满足程度均为0。由此可见,在4个时期内流域缺水量分别为6.65×10⁸ m³、7.49×10⁸ m³、6.11×10⁸ m³及5.84×10⁸ m³。

3.3.2　克孜河流域恢复地下水位所需水量　根据上述研究发现,克孜河流域对于天然植被的水资源补给短缺十分严重,为保证天然植被的良性生长状态,增加天然植被需水补给,提高流域地下水位是最有效的方法。因此为计算克孜河流域天然植被

表3 克孜河流域天然植被生态需水量满足程度时序变化

Tab. 3 Time series changes in the satisfaction degree of natural vegetation ecological water demand in the Kezi River Basin

年份	来水量/10^8 m^3	河道基流量/10^8 m^3	年蒸发水量/10^8 m^3	流域居民引水量/10^8 m^3	剩余水量/10^8 m^3	天然植被可用水量/10^8 m^3	天然植被生态需水量/10^8m^3	天然植被缺水量/10^8 m^3	天然植被需水满足程度/%
1990	30.09	9.03	5.92	13.83	1.31	1.31	7.96	6.65	16.48
2000	27.83	8.35	4.3	15.71	−0.53	0	7.49	7.49	0.00
2010	33.48	10.04	3.46	19.43	0.54	0.54	6.65	6.11	8.13
2018	27.19	8.16	2.76	24.55	−8.29	0	5.84	5.84	0.00

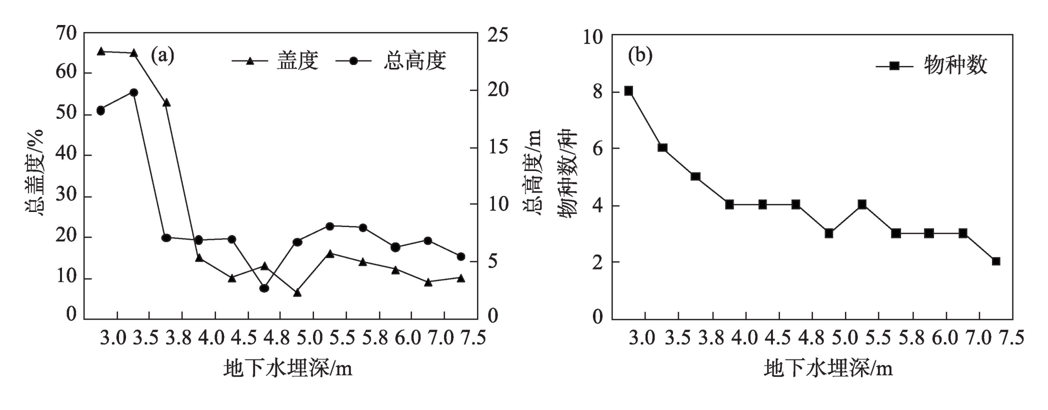


图5 克孜河流域地下水埋深与植被特征变化的关系

Fig. 5 The relationship between groundwater depth and vegetation characteristics in the Kezi River Basin

的地下水蒸发的极限埋深，对克孜河流域现状年不同地下水位的天然植被特征进行调查，结果表明流域植被特征在不同的地下水位范围内差异明显，由图5可以看出，随着地下水位的下降，植被的总高度、盖度及物种个数整体呈现下降的变化趋势，其中物种个数从最高6种减少至2种，说明随着水分条件的恶化，群落结构趋向单一化。同时，由于在地下水位埋深较高区域其植被主要以多年生乔、灌木为主，本次调查所选样点在5.5~7.5 m的地下水埋深范围内，仅有胡杨及柽柳2个物种。胡杨高度与柽柳盖度占比较大，在5.5 m的地下水埋深处植被的总高度和盖度呈现反增高变化趋势。5.5 m是克孜河流域植被特征发生显著变化的地下水位埋深，而这一结果与王让会等[18]对研究西北干旱区流域天然植被潜水蒸发的极限埋深所确定的5.0 m十分相近，因此，将5.5 m定为克孜河流域天然植被地下水蒸发的极限埋深。

由于不同河段现状水分条件的不同，以克孜河上、中、下游河段断面内监测地下水位的平均值作为区域现状地下水埋深，根据公式(5)计算克孜河流域地下水埋深恢复至5.5 m所需水量结果(表4)，即上、中、下游河段恢复水量分别为1.25×10^8 m^3、2.53×10^8 m^{3}及5.95×10^8 m^3，流域总计恢复需水量为9.73×10^8 m^3。

4 讨 论

克孜河流域地处极端干旱的欧亚大陆腹心地带，东部为塔克拉玛干沙漠，气候干燥，蒸发强烈，

表4 克孜河流域地下水恢复水量

Tab. 4 Groundwater restoration water volume in Kezi River Basin

流域河段	行政区域	2018年平均地下水埋深/m	区域天然植被面积/km^2	恢复地下水位所需水量/10^8 m^3
流域山区上游区域	阿克陶、乌恰县	5.89	3566.92	1.25
流域绿洲中游区域	疏附县、喀什市、疏勒县、岳普湖县、伽师县	6.85	2083.64	2.53
流域荒漠下游区域	巴楚县、图木舒克市、柯坪县、阿瓦提县	10.89	1226.51	5.95
总计	–	–	6877.08	9.73

平原降水少,年平均大风及沙尘日数近300 d,主要受春旱、夏洪、盐碱及风沙危害。流域自然生态环境十分脆弱,天然植被极为宝贵[22]。但近些年来,流域耕地面积呈现持续扩大态势(图6),1990年克孜河流域耕地面积2278.24 km²,至2018年耕地面积扩张至4045.11 km²,增长面积1766.86 km²,增长幅度77.55%。经调查发现流域内确实存在耕地的扩张以破坏天然植被为代价的现象,使得耕地侵占天然植被现象非常严重。除此之外,流域内存在严重的风蚀与水蚀环境问题,风蚀作用主要分布在绿洲北部边缘及克孜河沿岸植被稀疏的荒漠带;同时由于区域降水量稀少,在北部山前戈壁荒漠区和中部克孜河洪泛区的局部地带存在较严重的水蚀现象[23]。由此可见,在人类活动加之自然灾害的共同影响下,导致流域天然植被面积减少,植被覆盖度也随之减少。因此,为响应"十五"到"十二五"[24]会议中提到的生态文明建设,切实改善流域生态环境现状,建议可从流域上游区域,即水资源条件良好区域逐渐向下游实施山区退耕还林,植树造林及围栏封育等活动,在长期的过程中,能够改善自然灾害现状的同时逐渐恢复流域的天然植被。

另外,根据河流水系多年来水量的皮尔逊Ⅲ型频率分布曲线,当某年来水频率≤25%时,河流处于丰水年;来水频率介于25%~50%之间时,河流处于平水年;当来水频率＞75%时,则河流水系进入枯水年[25]。按此推算,克孜河流域1990年与2010年及2000年与2018年分别进入丰水年与平水年,根据上述计算发现,流域在丰水年与平水年河道来水量均不能完全满足流域天然植被生态需水量,克孜河进入枯水年时,其径流量更不能满足天然植被的需水量。因此,建议利用汛期洪水治理克孜河下游,克孜河洪水和克州境内下泄洪水是形成研究内土壤水力侵蚀的主要因素。长期以来,流域所在的克州境内下泄的洪水淹没绿洲北缘的房舍、农田,造成巨大损失。洪水于布哈拉枢纽之前溃堤改道,泄入南边的艾西库勒洼地,致使克孜河流域下游长期干涸断流,土壤沙化,两岸天然荒漠林面积有所减少。采取引导洪水灌溉天然荒漠林,既可以减少洪水对绿洲区带来的灾害,又可为下游断流区域植被提供生长所需水量[26]。

克孜河流域生境复杂,生态系统的功能与结构各有所差异性,现有参数并不能十分准确地反映其天然植被缺水及恢复水量的真实状况[26-27],例如天然植被的可调用水量中包含了来水后除基本生态环境需水量、蒸发、居民引水外的剩余水量及河道的渗漏水量,但其中渗漏水量的走向也十分复杂,并不是完全被天然植被所利用。即便如此,现有的

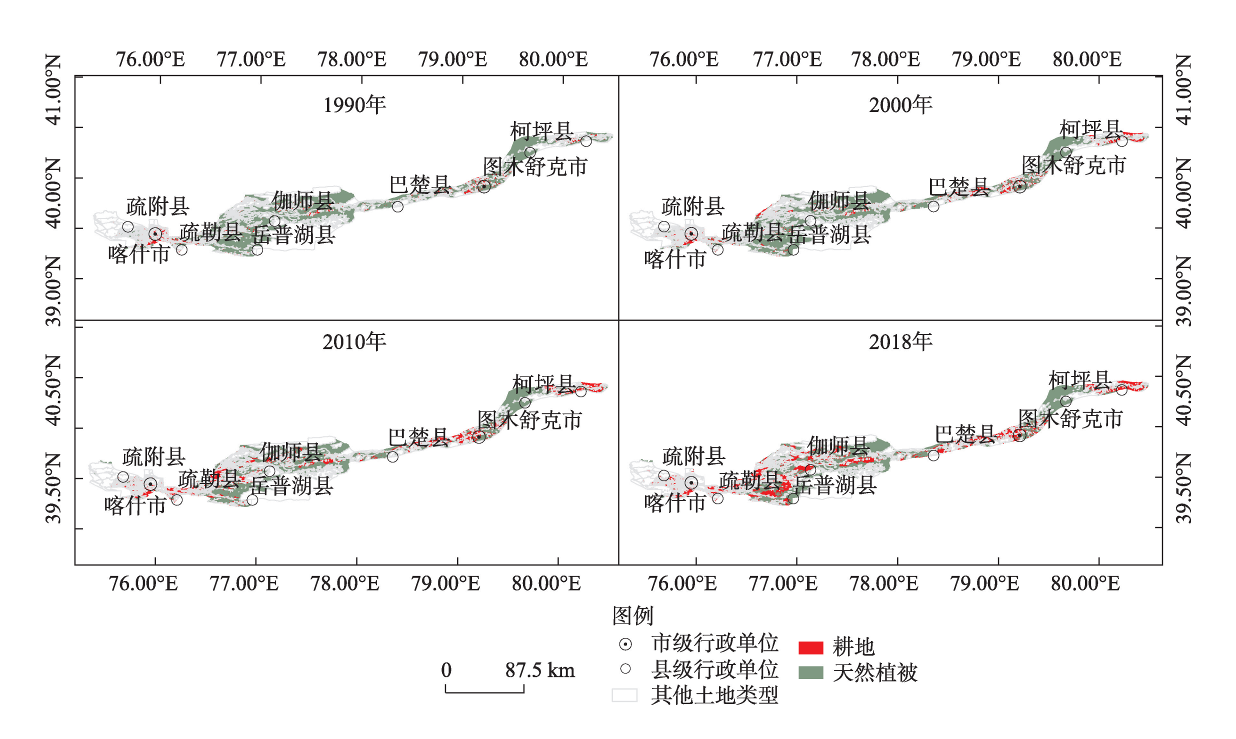


图6　克孜河流域4个时期内耕地与天然植被分布变化

Fig. 6　Distribution changes of cultivated land and natural vegetation in the four periods of Kezi River Basin

结果仍旧可以体现克孜河流域天然植被缺水十分严重的现状及补水工作的迫切,这一结果能为今后流域环境保护政策提供相应的数据支撑。

5 结 论

(1) 克孜河流域天然植被面积在28 a年间减少1612.48 km^2,减少幅度18.99%,总覆盖度减少22.26%。面积减少变化最大的为中覆盖草地,最小的为低覆盖草地,分别减少760.45 km^2与402.18 km^2,流域内耕地面积的迅速增长及严重风蚀与水蚀的环境问题是天然植被减少的主要原因。

(2) 克孜河流域天然植被在4个时期内的需水量分别为7.69×10^8 m^3、7.49×10^8 m^3、6.65×10^8 m^3及5.84×10^8 m^3。在4个时期内流域天然植被需水量最高的植被类型均为中覆盖草地,生态需水量分别为3.59×10^8 m^3、3.63×10^8 m^3、2.92×10^8 m^3及2.42×10^8 m^3,需水量最低的植被类型均为疏林地,4个时期需水分别为0.19×10^8 m^3、0.19×10^8 m^3、0.18×10^8 m^3及0.17×10^8 m^3。

(3) 克孜河流域1990年与2010年天然植被需水的满足程度分别为16.48%与8.13%,2000年与2018年则均为0。4个时期内流域来水均无法完全满足天然植被的生态需水量,且分别缺水6.65×10^8 m^3、7.49×10^8 m^3、6.11×10^8 m^3及5.84×10^8 m^3,可见流域缺水现象已十分严重。为保证天然植被的生态需水,确定5.5 m为潜水蒸发极限地下水位埋深,就现状而言地下水埋深恢复至5.5 m所需水量为9.73×10^8 m^3。

参考文献(References):

[1] 奚歌, 刘绍民, 贾立. 黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被的生态需水量[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5356–5369. [Xi Ge, Liu Shaoming, Jia Li. Estimation of regional evapotranspiration and ecological water requirement of vegetation by remote sensing in the Yellow River Delta wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5356–5369.]

[2] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630–640. [Bai Yuan, Xu Hailiang, Zhang Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim river based on groundwater restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630–640.]

[3] 何永涛, 闵庆文, 李文华, 等. 森林植被生态需水量的确定和计算——以泾河流域为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 152–155. [He Yongtao, Min Qingwen, Li Wenhua, et al. Calculation of ecological water requirement of forests in Jinghe watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 152–155.]

[4] 王新英, 史军辉, 刘茂秀, 等. 洪水漫溢对塔里木河中游天然胡杨林叶渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1544–1551. [Wang Xinying, Shi Junhui, Liu Maoxiu, et al. Effects of flood overt-opping on leaf osmotic adjustment substances and antioxidant enzyme activities of natural *Populuseuphratica* forest in the middle reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1544–1551.]

[5] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6282–6291. [Hu Guanglu, Zhao Wenzhi. Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6282–6291.]

[6] 王雅梅, 张青青, 徐海量, 等. 生态输水前后台特玛湖植物多样性变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1186–1193. [Wang Yamei, Zhang Qingqing, Xu Hailiang, et al. Change of plant diversity in the Taitema Lake Area before and after implementing the ecological water conveyance[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1186–1193.]

[7] 魏乐民, 郑续, 郭建军, 等. 基于改进彭曼公式法的疏勒河流域植被耗水时空分布研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1416–1426. [Wei Lemin, Zheng Xu, Guo Jianjun, et al. Spatial and temporal distribution of vegetation water consumption in Shule River Basin based on improved penman formula method[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1416–1426.]

[8] 武永利, 马雅丽, 栾青. 晋西黄土丘陵区植被生态需水研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 153–158. [Wu Yongli, Ma Yali, Luan Qing. Ecological water requirement for vegetation in Loess hilly area of western Shanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(6): 153–158.]

[9] 周丹, 沈彦俊, 陈亚宁, 等. 西北干旱区荒漠植被生态需水量估算[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 670–680. [Zhou Dan, Shen Yanjun, Chen Yaning, et al. Estimation of ecological water requirement of desert vegetation in the arid region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 670–680.]

[10] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 33–38. [Wang Genxu, Cheng Guodong. Water demand of eco-system and estimate method in arid inland river basins[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(2): 33–38.]

[11] 张瑞君, 段争虎, 谭明亮, 等. 石羊河流域天然植被生态需水量估算及预测[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 545–550. [Zhang Ruijun, Duan Zhenghu, Tan Mingliang, et al. Evaluation and prediction of ecological water requirement of natural vegetationin Shiyang River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 545–550.]

[12] 胡永超. 新疆喀什噶尔河流域克孜河下游水土流失现状及对策[J]. 水土保持通报, 2004, 24(3): 54–56. [Hu Yongchao. Soil and

water loss situation and countermeasures in downstream area of Kezi River in Kaxgar River Basin of Xinjiang Wei Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(3): 54-56.]

[13] 程苗苗, 江洪, 陈健, 等. 基于Landsat数据的新疆和田地区植被覆盖变化研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1239-1244, 1250. [Cheng Miaomiao, Jiang Hong, Chen Jian, et al. Study on the dynamic change of oasis vegetation cover by landsatdata in Hetian District, Xinjiang Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(3): 1239-1244, 1250.]

[14] 叶朝霞, 陈亚宁, 李卫红. 基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 451-461. [Ye Zhaoxia, Chen Yaning, Li Weihong. Ecological water demand of vegetation based oneco-hydrological processes in the lower reaches of Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(5): 451-461.]

[15] 郭宏伟, 徐海量, 凌红波. 塔里木河流域枯水年生态调水方式及生态补偿研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1705-1717. [Guo Hongwei, Xu Hailiang, Ling Hongbo. Study of ecological water transfer mode andecological compensation scheme of the Tarim River Basin in dry years[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10): 1705-1717.]

[16] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 荒漠河岸林建群植物的水分利用过程分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 130-136. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Water use process of constructive plants in desert riparian forest[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 130-136.]

[17] 徐海量, 叶茂, 李吉玫. 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J]. 自然科学进展, 2007, 17(4): 460-470. [Xu Hailiang, Ye Mao, Li Jimei. Dynamic changes of groundwater and ecological response of natural vegetation after water delivery to the lower reaches of the Tarim River[J]. Advances in Natural Science, 2007, 17(4): 460-470.]

[18] 王让会, 卢新民, 宋郁东, 等. 西部干旱区生态需水的规律及特点——以塔里木河下游绿色走廊为例[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 520-524. [Wang Ranghui, Lu Xinmin, Song Yudong, et al. Patterns and characteristics of ecological water demand in west arid zone of China: A case study of green coridor in the lower reaches of Tarim River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(4): 520-524.]

[19] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价——以石河子垦区为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(9): 1-13. [Zhang Zhijun, Chen Fulong, Long Aihua, et al. Assessment of water resource security in an arid area based on an extension cloud model: A case study of Shihezi District[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(9): 1-13.]

[20] Tian J H, Yu L, Zheng Z H. A study of ecological water use based on the improved tennantmethod[J]. Advanced Materials Research, 2010, 956(229): 1504-1508.

[21] 关洪涛, 杨泽慧, 宋剑鹏, 等. 和田河绿色走廊天然生态需水量估算[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 71-74. [Guan Hongtao, Yang Zehui, Song Jianpeng, et al. Estimation of the requiring water quantity for maintaining the natural vegetation in Hetianhe river green corridor[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(1): 71-74.]

[22] 张如强, 刘俊国, 冒甘泉, 等. 基于改进RVA法的黑河上游水文情势变化分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 29-38. [Zhang Ruqiang, Liu Junguo, Mao Ganquan, et al. Flow regime alterations of upper Heihe River based on improved RVA[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 29-38.]

[23] 曾妍妍, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什噶尔河流域地下水形成的水文地球化学过程[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 541-550. [Zeng Yanyan, Zhou Jinlong, Nai Weihua, et al. Hydrogeochemical processes of groundwater formation in the Kashgar River Basin, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 541-550.]

[24] 黄劲柏, 蒋海英. 克孜河古河道现状及治理措施[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(4): 5-6. [Huang Jinbai, Jiang Haiying. The current situation of the ancient river course of Kezi River and its treatment measures[J]. Henan Water Conservancy and South-to-North Water Diversion, 2019, 48(4): 5-6.]

[25] 边慧芹, 王雪梅. 近13年渭干河-库车河绿洲植被覆盖动态变化分析[J]. 草业科学, 2018, 35(12): 2845-2854. [Bian Huiqin, Wang Xuemei. Analysis of dynamic change in the past 13 years in vegetation covering the delta oasis of Weigan-Kuqa River[J]. Prataculral Science, 2018, 35(12): 2845-2854.]

[26] 党丽娟, 徐勇, 徐学选. 黄土丘陵区地表水和地下水对降水的响应——以康沟小流域为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 87-94. [Dang Lijuan, Xu Yong, Xu Xuexuan. Responses of the surface water and ground water to precipitation in the Loess Hilly-gully Region: A case study of Kanggou Watershed[J]. Progress in Geography, 2011, 30(1): 87-94.]

[27] 贡璐, 吕光辉, 丁建丽, 等. 塔里木河上游土地利用变化中的生态价值损益分析[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 526-530. [Gong Lu, Lyu Guanghui, Ding Jianli, et al. Profit and loss analysis on ecological value in upper reaches of Tarim River under land use changes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(5): 526-530.]

The status of natural vegetation water demand in the Kezi River Basin in recent over 28 years

LI Li[1], ZHANG Qingqing[1], LI Hong[1], WANG Yamei[1], ZHAO Xinfeng[2,3,4]

(1. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Aksu Farmland Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, National Field Scientific Observation and Research Station, Alar 843300, Xinjiang, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The natural vegetation of the Kezi River Basin is essential to the ecological environment, economic development, and social benefits of the entire region. The dynamic changes in time and space of the natural vegetation in the Kezi River Basin in 1990, 2000, 2010, and 2018 were analyzed using Lansat TM images and annual statistical data of the watershed. Using diving evapotranspiration, the ecological water demand of natural vegetation in the basin was calculated during these four periods. Then, the author combined the research results of the predecessors to determine the limit buried depth of natural vegetation evaporation in the Kezi River Basin, which is the lowest groundwater level that can meet the ecological water requirements of the natural vegetation in the Kezi River Basin, and the amount of water that needs to be restored. We found that between 1990 and 2018, the area of natural vegetation in the Kezi River Basin reduced by 1612.48 km^2. The overall reduction over the 28 years was 18.99%, and the total vegetation coverage also decreased by 22.26%. Additionally, the water demand of natural vegetation in the Kezi River Basin during the four periods was 7.69×10^8 m^3, 7.49×10^8 m^3, 6.65×10^8 m^3, and 5.84×10^8 m^3, respectively. During the four periods, the vegetation types with the highest water requirements for natural vegetation in the basin were medium-covered grasslands, and the ecological water requirements were 3.59×10^8 m^3, 3.63×10^8 m^3, 2.92×10^8 m^3, and 2.42×10^8 m^3, respectively. The vegetation with the lowest water requirement were sparse forest land, and the water requirements in the four periods were 0.19×10^8 m^3, 0.19×10^8 m^3, 0.18×10^8 m^3, and 0.17×10^8 m^3, respectively. The water requirements of natural vegetation in the Kezi River Basin in 1990 and 2010 were 16.48% and 8. 13%, respectively, and they were zero in both 2000 and 2018. In the four periods, the inflow of water in the basin could not fully meet the ecological water demand of natural vegetation, and the water shortages were 6.65×10^8 m^3, 7.49×10^8 m^3, 6.11×10^8 m^3, and 5.84×10^8 m^3, respectively, which shows that water shortage in the basin has been severe. The phreatic evaporation limit groundwater depth was estimated as 5.5 m to ensure the ecological water demand of natural vegetation. Based on the current data, the water required to restore the groundwater depth to 5.5 m is 9.73×10^8 m^3.

Keywords: natural vegetation; ecological water requirement; Kezi River Basin; satisfaction degree